

(19)日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-233062

(43)公開日 平成11年(1999)8月27日

(51)Int.Cl.⁹

識別記号

F I

H 0 1 J 49/48

H 0 1 J 49/48

37/147

37/147

Z

37/29

37/29

審査請求 未請求 請求項の数3 F D (全 6 頁)

(21)出願番号

特願平10-44653

(71)出願人 000004271

日本電子株式会社

(22)出願日

平成10年(1998)2月10日

東京都昭島市武蔵野3丁目1番2号

(72)発明者 嘉 藤 誠

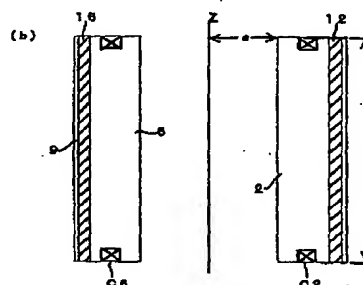
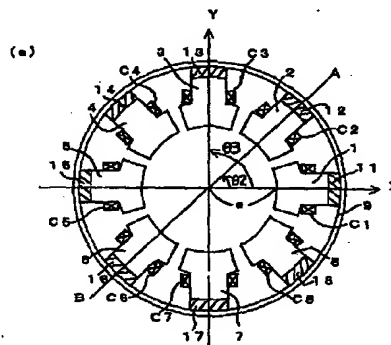
東京都昭島市武蔵野3丁目1番2号 日本
電子株式会社内

(54)【発明の名称】 ウィーンフィルタ及び直接写像型反射電子顕微鏡

(57)【要約】

【課題】 2次と3次の開口収差を同時に補正することができるウィーンフィルタを提供すること。

【解決手段】 1～8は電極と磁極を兼ねた電磁極であり、それらは同じ形状である。これらの電磁極1～8は、電気絶縁体11～18を介してそれぞれ筒状体9の内側に45度の等間隔で取り付けられており、電磁極1～8には、コイルC1～C8がそれぞれ巻かれている。図示していないが、各コイルは電流源に接続されており、また、各電磁極は電圧源に接続されている。このような8極の電磁極から成るウィーンフィルタにおいては、各電磁極に独立の電圧をかけることができ、また、各電磁極の励磁を独立に制御することができる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 電極と磁極を兼ねた電磁極を少なくとも8極有するウィーンフィルタにおいて、2次及び3次の収差の影響を小さくするために、前記各極にかかる電圧と各極のコイルに流れる電流をそれぞれ制御する制御手段を備えていることを特徴とするウィーンフィルタ。

【請求項2】 光軸をz方向にとり、それに直行するxy平面内における極座標(r, θ)を用いて、前記8極の電磁極による電場と磁場の分布を、

$$\Phi(r, \theta) = -E_1 r \cos \theta - E_2 r^2 \cos 2\theta - E_3 r^3 \cos 3\theta - E_4 r^4 \cos 4\theta$$

$$\Psi(r, \theta) = -B_1 r \sin \theta - B_2 r^2 \sin 2\theta - B_3 r^3 \sin 3\theta - B_4 r^4 \sin 4\theta$$

(但し、Φは静電ポテンシャル、Ψは磁気スカラーポテンシャル)と表し、これらのフーリエ係数を無次元化して、パラメータ

$$e_2 = (E_2/E_1) R_0, \quad b_2 = (B_2/B_1) R_0$$

$$e_3 = (E_3/E_1) R_0^2, \quad b_3 = (B_3/B_1) R_0^2$$

$$e_4 = (E_4/E_1) R_0^3, \quad b_4 = (B_4/B_1) R_0^3$$

(但し、 $R_0 = L/(\pi\sqrt{2})$ で、Lはフィルタ長である)と表すとき、 $e_2 = -1$, $b_2 = -3/4$, $e_3 = 0.563$, $b_3 = 0.188$, $e_4 = b_4 = -0.180$ となるように、前記制御手段は、前記各極にかかる電圧と各極のコイルに流れる電流をそれぞれ制御することを特徴とする請求項1記載のウィーンフィルタ。

【請求項3】 電子ビーム源と、該電子ビーム源からの1次電子ビームを試料に向けて照射するための照射レンズ系と、試料の前方に配置され、前記電子ビーム源からの1次電子ビームを偏向して試料に垂直に入射させると共に、試料から発生される電子を直進させる第1のウィーンフィルタと、該第1のウィーンフィルタと試料との間に配置され、試料と共にエミッションレンズを形成する電子光学部材と、前記第1のウィーンフィルタを通過した電子の中から所定のエネルギーを有する電子のみを選別する第2のウィーンフィルタを備えた直接写像型反射電子顕微鏡において、前記第2のウィーンフィルタは、電極と磁極を兼ねた電磁極を少なくとも8極有し、2次及び3次の収差の影響を小さくするために、前記各極にかかる電圧と各極のコイルに流れる電流をそれぞれ制御する制御手段を備えていることを特徴とする直接写像型反射電子顕微鏡。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、エネルギーアナライザあるいはエネルギーフィルタの一種である、ウィーンフィルタに関する。

【0002】

【従来の技術】 エネルギーアナライザは、オージェ電子分光や光電子分光などの装置で用いられる他、電子顕微鏡において、特定のエネルギーをもった電子だけを選

んで結像させるEnergy-Filtering Microscopyのためにも用いられる。このような装置において、電子分光系としての性能、すなわちエネルギー分解能と感度を決定する主たる要因の一つに、アナライザの収差がある。これは、アナライザの入口において許される電子ビームの開き角の上限を決めるものである。この収差を小さくすればするほど電子を取り込める角度が広がり、ある一定のエネルギー分解能のもとでの感度を向上させることができる。同じことであるが、ある一定の感度のもとでのエネルギー分解能を向上させることができる。逆に、この収差が大きいと、アナライザの出口、つまりエネルギー選別面においてビームがボケてしまい、エネルギー分解能と感度を損なうことになる。そこで、アナライザの収差を低減する問題は、電子分光装置の性能を向上させるための重要な課題となる。

【0003】 さて、ウィーンフィルタは、互いに直交する電場と磁場からなる。このウィーンフィルタにおいては、ある特定のエネルギーをもった電子に対しては、電場と磁場からの力が打ち消し合い、その電子はフィルタを通過できるが、そうでない電子は、偏向されて通過できなくなる。

【0004】 ウィーンフィルタは、他の種類のエネルギーアナライザに比べて次の特徴がある。まず、他のアナライザが例外なく光軸が曲線であるのに対し、ウィーンフィルタだけが光軸が直線である。これは、電子分光系の他の光学要素が、ほとんどの場合軸対称レンズで構成されるという事実と整合し、軸合わせや光学調整を容易にする。これは特に、調整が微妙になるEnergy-Filtering Microscopyにおいては、非常に重要な長所となる。

【0005】 また、他のアナライザは、種類によって収差係数が決まってしまう。例えば、電子分光装置で最も多く用いられている静電半球エネルギーアナライザ(HSA)では、その光軸の半径を r_0 とすると、入射角 α_0 の時の出口でのエネルギー分散方向のビームの収差 Δx は、 $\Delta x = 2 r_0 \alpha_0^2$ で与えられる。この $2 r_0$ は2次の開口収差係数と呼ばれる。アナライザの性能を決めるのは、エネルギー分散方向において入射角のn乗に比例する収差であり、これはn次の開口収差と呼ばれる。nが小さいほど収差の影響が大きく、2次が最低次である。開口収差が何次から始まるかでアナライザの性能の程度がわかる。HSAでは、この収差を有効に補正する方法がなく、収差の程度としては大きい部類に入る。

【0006】 これに対し、ウィーンフィルタでは、電場と磁場をつくる電極と磁極の形状、あるいはそれらにかかる電圧と励磁を調整することにより、収差補正が可能である。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】 さて、ウィーンフィルタの電磁場の分布と収差の次数の関係がRose (1

987, Optic 77, p26) によって詳しく調べられ、ウィーンフィルタの2次収差が消えるための条件が始めて示された。

【0008】しかしながら、ウィーンフィルタの3次収差が消えるための条件は未だ示されておらず、ウィーンフィルタの2次と3次の開口収差を同時に補正する方法は未だ示されていない。本発明はこのような点に鑑みて成されたもので、その目的は、2次と3次の開口収差を同時に補正する事ができるウィーンフィルタを提供することにある。

【0009】

【課題を解決するための手段】 この目的を達成するために、本発明のウィーンフィルタは、電極と磁極を兼ねた電磁極を少なくとも8極有するウィーンフィルタにおいて、2次及び3次の収差の影響を小さくするために、前記各極にかかる電圧と各極のコイルに流れる電流をそれぞれ制御する制御手段を備えていることを特徴とする。

【0010】

【発明の実施の形態】 以下、本発明について詳しく説明するが、その前に、Roseが示した、ウィーンフィルタの2次の開口収差の補正条件について説明する。

【0011】ウィーンフィルタは、基本的に直交する電場と磁場からなるが、光軸付近の場を厳密に直交させるのは容易なことではない。単純に平行電極と平行磁極を向かい合わせたのでは、場が直交するのは光軸上のみであり、ある開き角で入射するビームに対しては非常に大きな収差が発生する。最近になるまで性能の良いウィーンフィルタがつくられていなかったのは、収差を考慮した設計がほとんど行われていなかったためである。

【0012】しかしながら、もし厳密に直交する場がつくられたとしても、2次収差が存在し、決して収差の小さなアナライザになるわけではない。すなわち、最適条件は、電磁場が厳密に直交する状態からわずかに離れたところにある。上述したように、ウィーンフィルタの電磁場の分布と収差の次数の関係はRoseによって詳しく調べられ、2次収差が消えるための条件が始めて示された。

【0013】これを説明するために、まず電場と磁場の分布を次のように表す。

【0014】 $\Phi(r, \theta) = -E_1 r \cos \theta - E_2 r^2 \cos 2\theta - E_3 r^3 \cos 3\theta - E_4 r^4 \cos 4\theta \dots$

$\Psi(r, \theta) = -B_1 r \sin \theta - B_2 r^2 \sin 2\theta - B_3 r^3 \sin 3\theta - B_4 r^4 \sin 4\theta \dots$

Φ は静電ポテンシャル、 Ψ は磁気スカラーポテンシャルであり、それぞれを θ 方向にフーリエ展開で表している。E₁とB₁は電場と磁場の一様場成分であり、残りの高調波成分は、一様場からのずれを表す。2次の収差に対しては6極子成分、E₃、B₃までが寄与し、3次収差に対しては8極子成分、E₄、B₄まで寄与する。以下で

便利なように、これらのフーリエ係数を無次元化して、次のようなパラメータで表す。

【0015】

$e_2 = (E_2/E_1) R_0$, $b_2 = (B_2/B_1) R_0$

$e_3 = (E_3/E_1) R_0^2$, $b_3 = (B_3/B_1) R_0^2$

$e_4 = (E_4/E_1) R_0^3$, $b_4 = (B_4/B_1) R_0^3$

ここで、 $R_0 = L/(\pi\sqrt{2})$ であり、Lはフィルタ長である。

【0016】さて、これまで、ウィーンフィルタの収差を考えない時の基本型は、互いに直交する一様な電場と磁場であるとされてきた。しかし、その場合はウィーンフィルタのレンズとしての集束力は電場方向(x方向、エネルギー方向)にしか存在せず、x方向に広がって入射したビームは収差によるボケを考えなければ1点に集束するが、y方向に広がったビームはそのまま直進してしまう。アナライザの出口に置く、エネルギーを選り分けるスリット及び電子検出器が充分長ければ、分光系としては原理上は支障はないが、実際には、感度を損なわないためにy方向にも集束するほうが望ましい。このように両方向で集束力をもつための条件を、stigmatic条件と呼ぶ。ウィーンフィルタの場合、これは、電場あるいは磁場、あるいは両方に4重極成分をもたせることで実現できる。上で定義したパラメータを用いると、ウィーンフィルタのstigmatic条件は次のように表わされる。

【0017】 $e_2 - b_2 = -1/4$

さて、本論に戻ると、ウィーンフィルタの開口収差は次の形で表わされる。

【0018】

【数1】

30

$$\Delta u = \sum_{p+q=n} C(p, q) u_0^p u_0^q$$

ここで、 $u_0' = \alpha_0 + i\beta_0$ で、 α_0 、 β_0 はそれぞれx方向とy方向の電子の入射角であり、 $\Delta u = \Delta x + i\Delta y$ はウィーンフィルタの出口での収差である。C(p, q)が開口収差係数であり、 $n = p + q$ がその次数である。まず、ウィーンフィルタの2次の開口収差係数は次のように与えられる。

【0019】

40 $C(20) = -(2R_0/3)(3 + 4b_2)$

$C(11) = -(4R_0/3)(3 + 4b_2)$

$C(02) = -8R_0(b_2 + 2(e_3 - b_3))$

これからすぐ導かれるように、stigmatic条件の制約のもとで上の収差が全て消える条件として、次式が得られる。

【0020】

$e_2 = -1$, $b_2 = -3/4$, $e_3 - b_3 = 3/8$

これが、Roseによって求められた、ウィーンフィルタの2次の開口収差の補正条件(Roseの条件)である。ただしRoseは、収差係数を求めてからではな

50

く、収差を決定する母関数 (Lagrange関数) から直接この条件を導いている。

【0021】以上、Roseが示した、ウィーンフィルタの2次の開口収差の補正条件について説明したが、以下に、3次開口収差の補正条件について説明する。ウィ *

$$\begin{aligned} C(30) &= \frac{\pi R_0}{24\sqrt{2}}(3+4b_2)(3+40b_2+60(e_3-b_3)) - \frac{\pi R_0}{8\sqrt{2}}(3+20b_2+12e_3) \\ C(21) &= \frac{\pi R_0}{6\sqrt{2}}(21+66b_2+140b_2^2+360b_2(e_3-b_3)+360(e_3-b_3)^2) - \frac{\pi R_0}{2\sqrt{2}}(5+6b_2+6b_2^2) \\ C(12) &= \frac{\pi R_0}{8\sqrt{2}}(3+4b_2)(3+40b_2+60(e_3-b_3)) - \frac{3\pi R_0}{8\sqrt{2}}(3+20b_2+12e_3) \\ C(03) &= \frac{\pi R_0}{\sqrt{2}}(3+10b_2)(b_2+2(e_3-b_3)) - \frac{3\pi R_0}{\sqrt{2}}(b_2+b_2^2+2e_3+4(e_4-b_4)) \end{aligned}$$

次に行うべきことは、Roseの条件のもとで、さらに3次の収差係数を補正する条件を探すことである。数値計算を行った結果、上記3次の開口収差係数を全て消す条件は存在しないが、エネルギー分散方向 (x方向) の収差のみなら0にできることがわかった。これは次の条件で与えられる。

【0023】 $e_2 = -1$, $b_2 = -3/4$, $e_3 = 0.563$, $b_3 = 0.188$, $e_4 - b_4 = -0.180$
3次収差の補正の効果を示すため、(A) stigmatic条 ※

*ウィーンフィルタの3次の開口収差の補正条件を求めるには、まず、3次の開口収差係数を求める。3次の開口収差係数の表式に対しての結果は次のようである。

【0022】

【数2】

※条件だけを満たす場合、(B) 2次収差の補正条件 (Roseの条件)、(C) 2次、3次収差の同時補正条件の場合についての、フィルタ出口でのスポットダイアグラムを図1に示す。これら3つの場合の多極子成分の値を下の表に示す。図1から、ここで求めた補正の効果は明らかである。

【0024】

【表1】

	A	B	C
e_2	-0.250	-1.000	-1.000
b_2	0	-0.750	-0.750
e_3	0	0.375	0.563
b_3	0	0	0.188
e_4	0	0	-1.180
b_4	0	0	0
aberration order	2	3	4

さて、上で求めた、3次収差までの補正条件を満たすには、8極子成分までを制御する必要がある。以下に、この3次収差までの補正条件を満たすウィーンフィルタの構造について説明し、また、各極にかける電圧と各極の励磁についても具体的に説明する。

【0025】図2は、そのウィーンフィルタの構造を示した図である。図2(a)は、フィルタのXY断面図であり、図2(b)は、図2(a)のA-B断面図である。

【0026】図2において、1~8は電極と磁極を兼ねた電磁極であり、それらは同じ形状である。これらの電磁極1~8は、電気絶縁体11~18を介してそれぞれ筒状体9の内側に45度の等間隔で取り付けられており、電磁極1~8には、コイルC1~C8がそれぞれ巻かれている。図示していないが、各コイルは電流源に接続されており、また、各電磁極は電圧源に接続されている。このような8極の電磁極から成るウィーンフィルタにおいては、各電磁極に独立の電圧をかけることがで

き、また、各電磁極の励磁を独立に制御することができる。

【0027】以上、図2を用いて本発明のウィーンフィルタの構造について説明したが、次に、各電磁極にかける電圧と各電磁極の励磁について具体的に説明する。

【0028】さて、電磁極 i ($i=1, 2, \dots, 8$)にかける電圧 V_i と、励磁 (アンペアターン) (NI) $_i$ は次のように決まる。なお、 N は各コイルの巻数であり、 I (アンペア) は各コイルに流れる電流値を表している。

(1) まず、電場について考えると、ポテンシャル分布 $\Phi(r, \theta) = -E_1 r \cos \theta - E_2 r^2 \cos^2 \theta - E_3 r^3 \cos^3 \theta - E_4 r^4 \cos^4 \theta$ ①

をつくるための各電磁極の電圧 V_i は、電磁極面に沿って $r=a$ であるから、各電磁極の θ 角を θ_i と書くと、 $V_i = -E_1 a \cos \theta_i - E_2 a^2 \cos^2 \theta_i - E_3 a^3 \cos^3 \theta_i - E_4 a^4 \cos^4 \theta_i$ ②

となる。なお、8極構造では、 $\theta_i = 2\pi(i-1)/$

8 ($i=1, 2, \dots, 8$) であり、例えば、前記電磁極1の $\theta_1=0$ 、電磁極2の $\theta_2=\pi/4$ である。

【0029】同様に、磁場に関して、

$$\Psi(r, \theta) = -B_1 r \sin \theta - B_2 r^2 \sin 2\theta - B_3 r^3 \sin 3\theta - B_4 r^4 \sin 4\theta \quad (3)$$

を実現するための各電磁極のアンペアターン $(NI)_i$ は、 μ_0 を真空の透磁率として、

$$\mu_0 (NI)_i = -B_1 a \sin \theta_i - B_2 a^2 \sin 2\theta_i - B_3 a^3 \sin 3\theta_i - B_4 a^4 \sin 4\theta_i \quad (4)$$

$$E_1 = 2\pi \sqrt{2} \phi_0 / L, \quad B_1 = (2\pi/L) \sqrt{(\mu_0 \phi_0 / e)} \quad (5)$$

なお、 e は電子の電荷、 m_0 は電子の質量である。

【0032】次に、 e_m 、 b_m と E_m 、 B_m ($m=2, \dots$)

$$e_m = E_m R_0^{m-1} / E_1, \quad b_m = B_m R_0^{m-1} / B_1 \quad (6)$$

であるので、

$$E_m = e_m E_1 / R_0^{m-1}, \quad B_m = b_m B_1 / R_0^{m-1} \quad (7)$$

となる。

【0033】以上のように、まず(5)から E_1 、 B_1 、次に(7)から E_2 、 E_3 、 E_4 、 B_2 、 B_3 、 B_4 が求められる。

(3) 具体的な数値例

★

極の番号	1	2	3	4	5	6	7	8
V_i (V)	-582	-572	-380	544	1396	544	-380	-572
$(NI)_i$ (アンペアターン)	0	-15	-36	-40	0	40	36	15

以上、8極子成分までの制御について、8極構造を例にあげて説明したが、それ以上の極を有する構造としても良い。すなわち、8極子成分まで制御するには最低で8極構造とすれば良い。

【0035】次に、このウイーンフィルタを直接写像型反射電子顕微鏡 (LEEM) に適用する場合について説明する。

【0036】図3は、その直接写像型反射電子顕微鏡を示した図である。図3において、電子銃21からの1次電子ビームは、10kV程度に加速され、照射レンズ系22によって集束される。ウイーンフィルタ23は、1次電子ビームの行路と、試料24からの反射電子の行路とを分離するためのものであり、 $E \times B$ 型エネルギーフィルタで構成されるが、その電場ベクトル E と磁場ベクトル B は、1次電子ビームが試料24に垂直に入射し、且つ反射電子に対してはウイーン条件を満足するように設定される。このことにより、1次電子ビームはウイーンフィルタ23によって大きく偏向され、試料24に向けて垂直に入射させられ、試料24から発生し、エミッションレンズ25で加速された反射電子はウイーンフィルタ23では何の偏向作用も受けず直進する。なお、試料24及び電極26、27にはそれぞれ所定の電圧が印加されており、これによって前記エミッションレンズ25が形成され、このエミッションレンズ25によって1次電子ビームは減速され、100V程度の加速電圧で

*となる。

(2) (1)において、 E_m ($m=1, 2, 3, 4$)、 B_m ($m=1, 2, 3, 4$)と V_i 、 $(NI)_i$ の関係が求まったので、あとは E_m 、 B_m を具体的に求めればよい。

【0030】まず、フィルタ長を L 、穴径 (半径) を a 、電子の加速電圧を ϕ_0 としたとき、 E_1 と B_1 が、ウイーンフィルタの一般論から次のように与えられる。

【0031】

※3、4)の関係は、

★ $L=100\text{mm}$ 、 $a=10\text{mm}$ 、 $\phi_0=1000\text{V}$ のときの各電磁極1～8の V_i 、 $(NI)_i$ は以下の通りである。

【0034】

【表2】

料24に入射する。

【0037】試料24から発生され、エミッションレンズ25で加速され、ウイーンフィルタ23を直進した反射電子は結像レンズ系28を通る。そして、エネルギー分析が行われるときには、反射電子は結像レンズ系28からウイーンフィルタ29に入射される。このウイーンフィルタ29として、前記図2に示した8極の電磁極からなるウイーンフィルタを用いれば、従来に比べ収差をおさえることができる。このウイーンフィルタ29によって種々のエネルギーを有する反射電子の中から所定のエネルギーを有する反射電子のみが選別され、選別された反射電子はウイーンフィルタ29を直進し、その像は結像レンズ系30により所定の大きさに拡大されてスクリーン31に結像される。これによって単色の像を観察することができる。

【0038】

【図面の簡単な説明】

【図1】 フィルタ出口でのスポットダイアグラムを示したものである。

【図2】 本発明のウイーンフィルタを説明するために示した図である。

【図3】 直接写像型反射電子顕微鏡を示した図である。

【表1】 多極子成分の値を示した表である。

【表2】 $L=100\text{mm}$ 、 $a=10\text{mm}$ 、 $\phi_0=10$

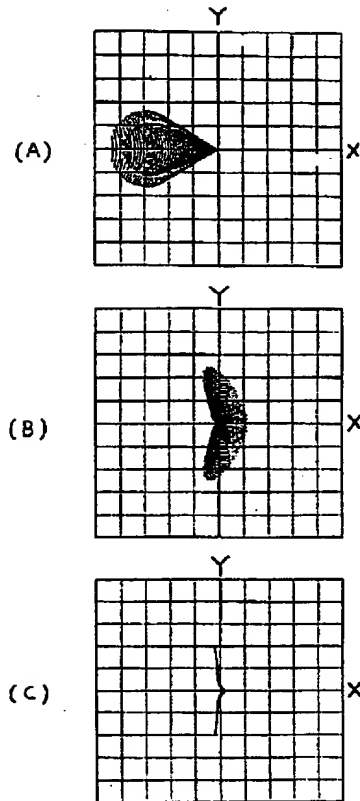
00Vのときの各電磁極1~8の V_i 、 $(NI)_i$ を示した表である。

【符号の説明】

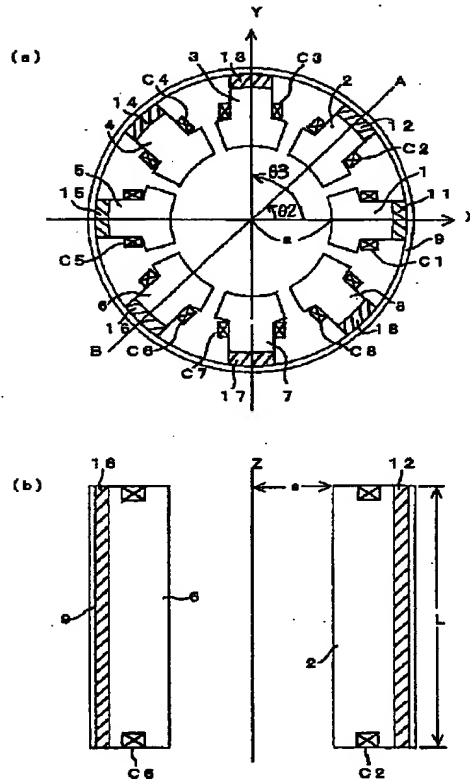
1~8…電磁極、9…筒状体、11~18…電気絶縁体、C1~C8…コイル、21…電子銃、22…照射レ

ンズ系、23…ウイーンフィルタ、24…試料、25、26…電極、27…結像レンズ系、28…結像レンズ系、29…ウイーンフィルタ、30…結像レンズ系、31…スクリーン

【図1】



【図2】



【図3】

